稻作智農技術研發與落地的生態系建構

賴明信[1]、吳東鴻[1]、陳繹年[2]、黃守宏[3]
[1] 農業部農業試驗所作物組
[2] 農業部農業試驗所植物病理組
[3] 農業部農業試驗所嘉義農業試驗分所植保系

摘要

自 106 年起，稻作智慧農業計畫開始執行第一階段 (106-109 年)，旨在因應產業發展的需求，主導或協同研發智慧農業技術。此階段不僅積累了產業轉型升級的能力，還成功普及了智慧農業的理念，達成了既定的發展目標。隨著 112 年第二階段 (112-115 年) 的啟動，計畫的重點轉向提升效率、安全性及降低風險。此階段不僅深化並延伸現有的智慧農業技術，還強調技術的實地應用與產業化，確保農民能夠切實感受到技術帶來的益處，並創造新的商機。在此過程中，成功落地的智慧農業技術包括葉稻熱病及褐飛蝨警示技術、營養與灌溉水管理技術，以及產量與穀粒水分預測技術等。透過生態系的建設，計畫成功建立了商業服務模式，並促成新型態農事服務公司的成立，為智慧農業的發展開啟了新的篇章。

關鍵詞：水稻、智慧農業、生態系、無人機多光譜技術、人工智慧

一、前言

糧食安全是全球各國共同重視的重要議題，各國積極未雨綢繆，以應對潛在的糧食危機。根據專家預測，至 2050 年和 2080 年，稻穀產量將分別減少 4.7%和 7%。然而，當前農業面臨的挑戰日益嚴峻，主要包括市場競爭力不足、勞動力老齡化、氣候變遷的影響以及水土資源的短缺等問題。隨著消費者對產品品質和安全性的要求不斷提高，市場競爭愈發激烈，農民的收益受到壓縮，特別是在全球化的背景下，價格戰愈演愈烈。小農因經營面積小、收入不穩定而難以維持生計。隨著農民年齡的增長，體力逐漸不足，從事重體力工作的能力下降，加上年輕人對農業工作的興趣減少，農民在經營過程中常常面臨人力資源短缺的困境。此外，氣候變遷導致極端天氣事件的頻率增加，溫度上升加速了病蟲害的繁殖，並使稻米在生長過程中的澱粉粒間出現空隙，從而提高了白堊質率，嚴重影響稻米的外觀品質和市場價值。再者，水土資源的日益短缺以及科技的迅速進步，使得農民在學習新技術方面缺乏有效的管道與能力。這些因素共同構成了農業發展的瓶頸，各國必須加強科技研究，制定有效的應對策略，以確保糧食安全和農業的可持續發展。

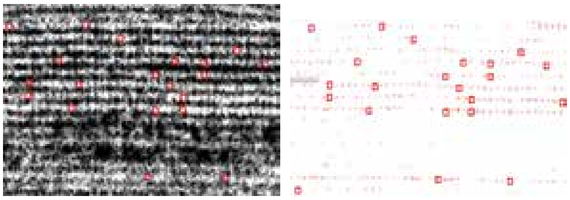
二、材料與方法

2.1 無人機與多光譜影像的應用

在現代農業中，無人機技術已逐漸成為農田監測的重要工具 (Hatfield et al., 2008)。無人機能搭載多光譜相機，該相機可同時捕捉多種光譜數據，包括紅光、綠光、藍光、紅光邊緣以及近紅外波段，從而為農田監測提供多元且全面的數據支持 (Cen et al., 2019)。這些多光譜影像資料將通過專業影像建模處理軟體 (例如 Pix4D Mapper) 進行分析，並利用地理資訊系統 (如 ArcMap) 生成測試區域的 shapefile，以提取植生指數 (如 NDVI、SAVI 等) 並進行後續的數據關聯分析。此技術可提供快速且精確的運算結果，讓農民及管理單位能夠及時掌握農田生長狀況，從而為科學化及精準化的農田管理奠定基礎。

2.1.1 葉稻熱病警示技術

本技術利用無人機搭載多光譜相機，根據特定光譜影像收集條件，對田間的稻熱病菌接種區與對照區進行影像資料的收集。影像經過拼接處理後，進一步進行正射影像光譜資訊的提取，並抽取植生參數進行分析。透過對不同區域植生參數的數學模式比對，可以辨別出兩區之間的差異，從而識別出受感染與未感染稻株的不同特徵 (Mahajan, 2016)。此技術能夠有效地建立葉稻熱病警示系統，提前發現稻株是否受到稻熱病菌的感染，即便在肉眼尚未能察覺病斑的情況下，農民也能夠早期獲得警示，從而進行預防性治療 (Moore et al., 2021)。無人機搭載的多光譜相機能夠對田區進行全方位的影像拍攝，並透過植生指數的分布來偵測病菌入侵的情況。系統能夠即時識別病菌入侵的跡象，當影像中出現紅色像素時，表示病菌已經侵入該稻株；而無色或低亮度的像素則表示病菌尚未侵入該區域的稻株。這一技術的應用，能夠幫助農民及時發現病害，提升防治效率，從而減少稻田損失 (如圖 1)。



收集紅光(R)、綠光(G)、藍光(B)、紅光邊緣(RGE)、近紅外(NIR)光等5個波段

植生指數	VI-1	VI-2	VI-3	VI-4	VI-5	VI-6
標到也有匡到	64	54	50	56	58	55
標到沒有匡到	16	26	30	24	22	25
總數	80	80	80	80	80	80
正確率	0.80	0.68	0.63	0.70	0.73	0.69

圖 1. 葉稻熱病警示技術

2.1.2 營養管理技術

本技術利用無人機拍攝作物影像，並通過影像數據建立回歸模型，估算水稻的

氮累積狀況，實現水稻植體的非破壞性測量與快速監測 (楊等，2018)。通過氮素營養指標 (nitrogen nutrition index, NNI) 和田間累積氮素差 (difference of field cumulative nitrogen) 等指標，並結合現地生理性狀的調查數據，進行綜合分析。該回歸模型能夠根據水稻植體氮含量計算出的 NNI，推估水稻在最盛分蘖期的葉色，進而推測水稻植體的氮含量，並在水稻進入幼穗分化期之前，提供最適穗肥施用量的決策建議。本技術使用 NDRE (normalized difference red edge) 植生參數來計算水稻目前的氮肥累積量，並將其與最佳氮素累積量進行對比。通過精確的數據分析，農民可以根據實際情況估算出每公頃所需的最適氮肥量，避免過度或不足施肥，達到精準施肥的目的 (賴等，2013)。這項技術不僅有助於提高水稻的營養管理效能，也能減少資源浪費，提升農業生產的可持續性與經濟效益 (如圖 2)。

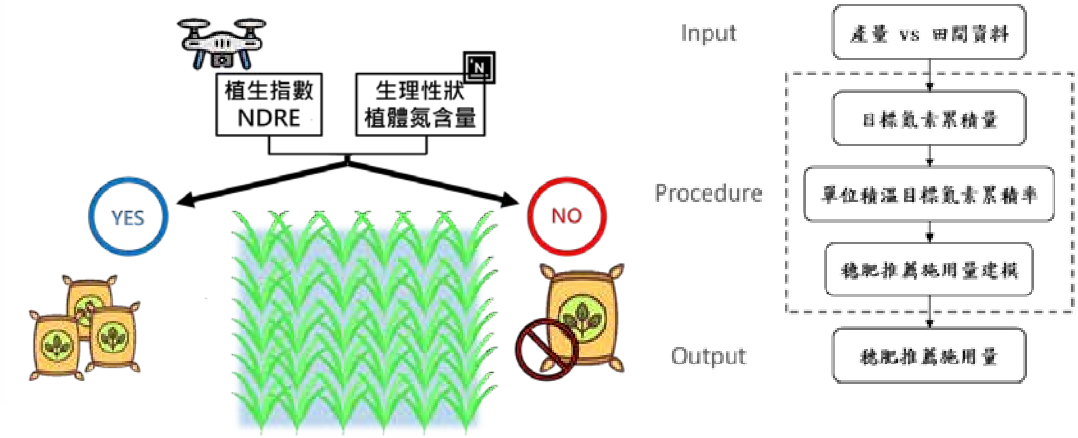


圖 2. 營養管理技術

2.1.3 產量預測技術

本技術通過無人機搭載多光譜相機，收集不同品種、不同生育時期的水稻影像資料，原始影像經過品質檢查、處理、校正與光譜數據提取後，形成可供利用的光譜資料。利用這些光譜資料，計算出植生參數 (vegetation index, VI)，以反映水稻在不同生育時期的生長狀況。由於水稻產量與其在各生育時期的植株狀態密切相關，而植生參數能夠有效表示植株的當前狀態，故希望透過機器學習 (machine learning) 和人工智慧 (AI) 演算法來探索影像資料與實際產量之間的關聯性 (Prasad et al., 2006; Guan et al., 2019)。鑑於農業資料收集較為困難，且在有限時間內能夠獲得的資料較為有限，本技術首先利用生成對抗網路 (generative adversarial network, GAN) 擴增資料訓練集，通過長短期記憶 (long short-term memory, LSTM) 模型，將擴增後的資料與實際產量資料結合，建立兩者之間的關聯模型。最終，訓練出四種不同的模式，分別適用於 NDVI、SAVI 或 MSR 等不同生育時期的植生指數，進行產量預測 (如圖 3)。

使用者只需收集數個特定生育時期的 NDVI、SAVI 或 MSR 等植生指數，即可透過本產量預測模式進行水稻產量的預估。該技術能夠幫助農民或農業管理部門提前了解水稻產量，進而做出更精確的生產與管理決策，提高農業生產效率與資源配置的合理性。

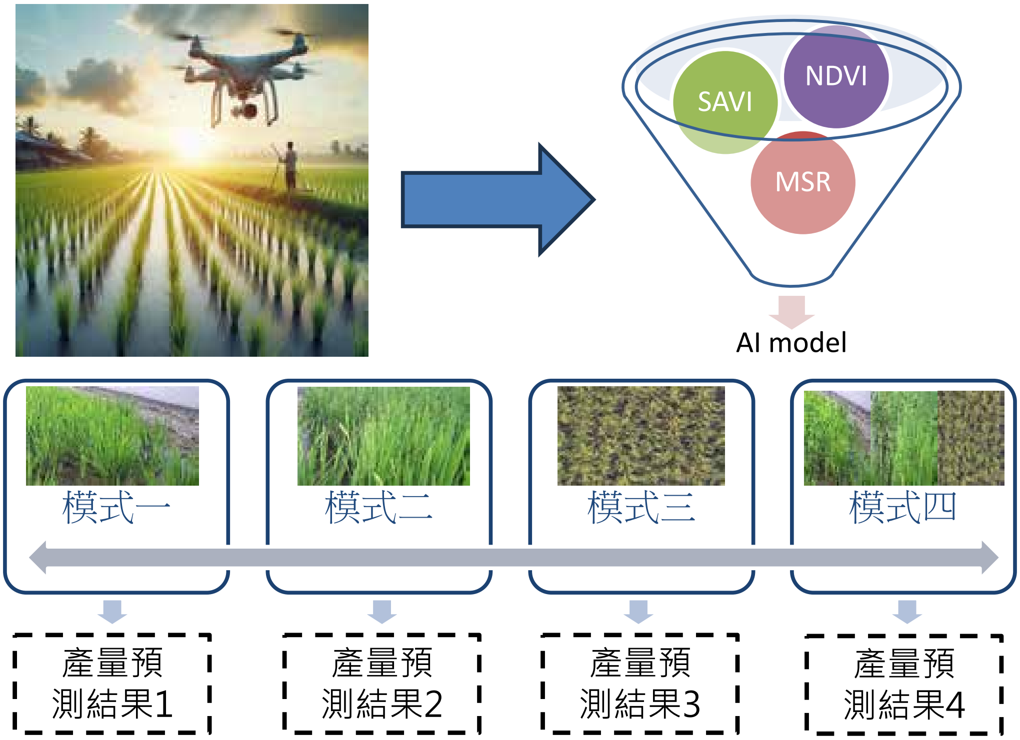


圖 3. 產量預測技術

2.1.4 穀粒水分預測技術

本技術的建構方法分為兩個主要部分：植體處理與影像分析。

1. 植體處理

首先，進行稻株樣本的採集及穀粒的脫粒，並對每個稻株的穀粒進行含水量測定。每次從脫粒後的穀粒中選取 150 粒以上，分三次進行含水量測定，並使用紅外線碾壓式含水量測定儀進行測量。這部分的數據將用於建立穀粒水分的基準數據。

2. 影像分析

在影像分析部分，首先進行光譜分析，並對影像中的稻穗進行分類與特徵提取。使用光譜數據，特別是選取對穀粒水分具有高靈敏度的波段進行分析。除 RGB 波段外，還通過植生指數 (如 GI、VARI 等) 進行光譜分析。針對不同波段組合進行優化處理，並對影像中的穗葉進行分離，專注於稻穗部分的特徵提取。

由於不同含水量的穀粒會表現出不同的表型特徵，為了凸顯這些顏色變化，影像將轉換至 HSV (色相、飽和度、明度) 色彩空間，並提取 H 波段來觀察穀粒的表型變化，通過將高敏感度波段信息進行疊加，並利用多層感知機 (multilayer perceptron, MLP) 將影像數據與實際的穀粒含水量進行回歸分析，建立穀粒含水量推估模型 (Yang et al., 2019; Zhang et al., 2020)。該技術能夠通過影像分析與實際測量數據的結合，準確預測水稻穀粒的水分含量，並提供精確的水分管理數據，有助於農民及農業管理部門在穀粒乾燥過程中進行更有效的監控與管理 (如圖 4)。

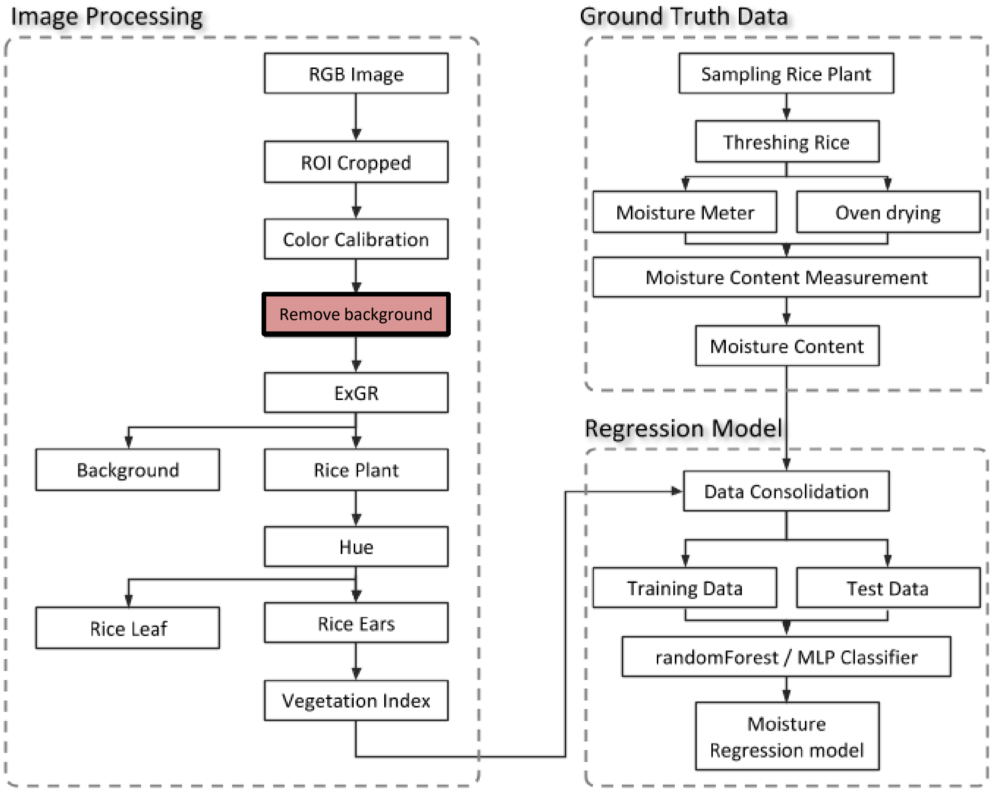


圖 4. 穀粒水分預測技術

2.2 手機與 IoT 的整合應用

2.2.1 褐飛蝨警示技術

本技術的核心在於建立一個影像辨識系統，該系統的運作流程包括影像收集、辨識核心建構、優化與完成系統的設計。首先，通過大量收集水稻莖基部的褐飛蝨影像，這些影像將作為模型訓練與檢驗的資料。使用機器學習與演算法分析影像中的褐飛蝨特徵，建立辨識模型 (Feng and Wang 2021; Gyamfi et al., 2022; Liu et al., 2016)。隨著更多情境下的水稻莖基部影像的加入，模型將不斷優化並提高辨識準確性 (Lin et al., 2019) 辨識系統部署於伺服器，使用者可上傳田間影像至伺服器，經過辨識後，系統將回饋辨識結果，提供即時的病蟲害監測資訊，幫助農民更早發現並處理褐飛蝨問題 (如圖 5)。

2.2.2 智能化灌溉水管理技術

本技術結合水田感應器、資料傳輸模組及垂直升降式電動水閘門或抽水馬達，構建了一個智慧灌溉水監控管理系統。該系統依據水稻的生育狀態，通過監控平台自動調整水位，並能夠根據不同的生育時期調整灌溉需求 (呂等，2013)。使用者可通過行動裝置上的應用程式監控並管理水稻灌溉狀況，達到節水、省電、省工以及提升水稻品質的目的。這種智慧灌溉系統不僅能有效節省水資源，還能提升作物生長環境的穩定性，實現精準農業管理 (如圖 6)。

圖 5. 褐飛蝨警示技術

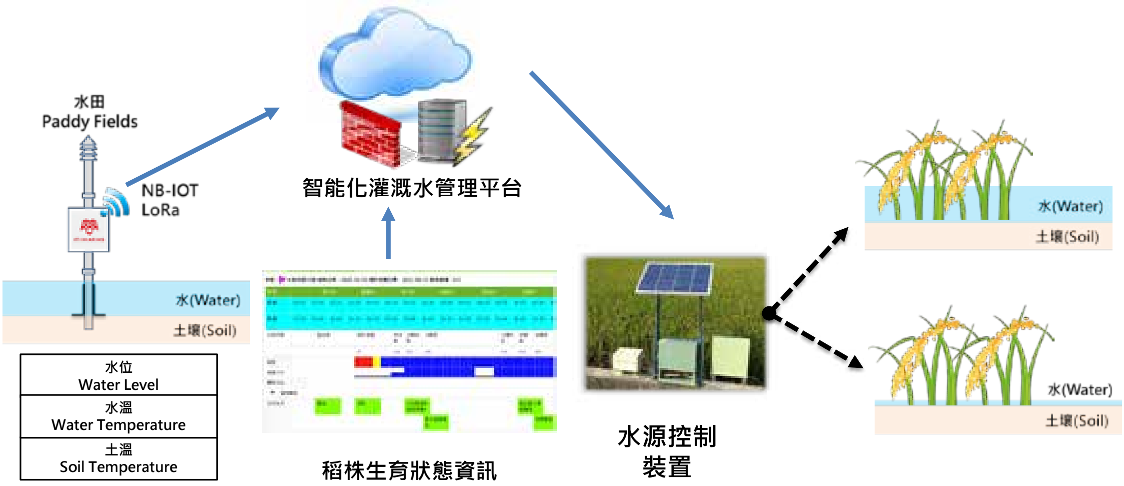


圖 6. 智能化灌溉水管理技術

2.3 智慧農業商業環境營建

智慧農業生態系的營建涉及多方合作與角色分工，並根據企業生態系的結構，將各參與者分為基石者、利基者與促進者三大角色。以稻作產業為例，這些角色分別承擔著不同的功能，協同推動智慧農業的發展。

基石者：作為價值整合者，基石者是稻米產銷專業區的營運主體，負責整合資源與協調各方合作，為整體生態系提供穩定的運營基礎。

利基者：利基者提供獨特的技術與資源，這些資源可能包括農業相關的軟硬體設備與專業服務。他們的貢獻在於提供能夠支持智慧農業的技術創新，進而提升農業生產效率。

促進者：促進者則是提供關鍵資源和支持的角色，通常包括政府、法人機構、學術單位等。他們主要負責提供資金、技術與政策支持，促進生態系中各方的協同發展。

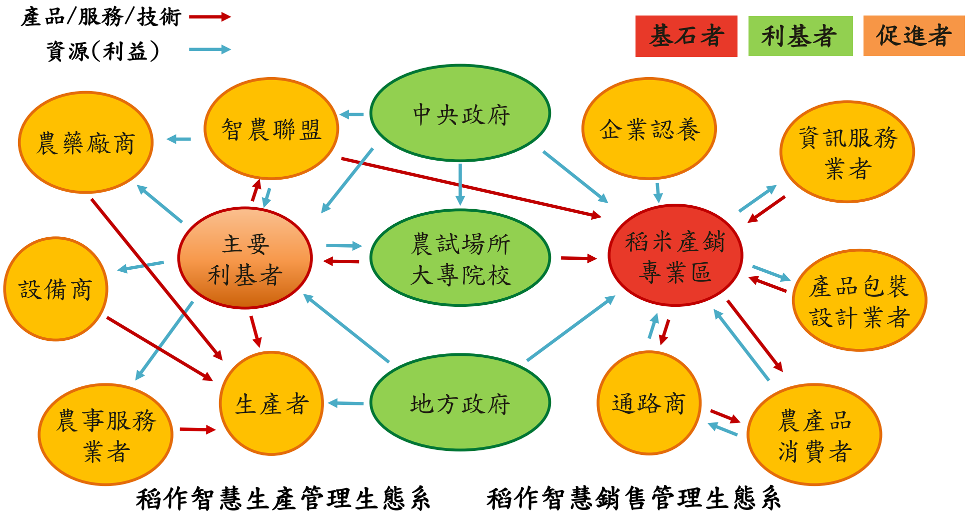


圖 7. 稻作智慧產銷生態系

三、結果與討論

隨著時代的變遷與科技進步，產業效率的需求日益提升，經營模式也在不斷變革。農業技術從早期依賴勞力與經驗的露地栽培，逐步發展為依靠機械與技術的簡易設施栽培，再進一步演化為以知識與自動化為基礎的精密設施栽培。隨著自動化技術、物聯網以及遠端控制技術的發展，農業生產應邁向智慧化與數位化，從過去“人當機器用”的模式，轉向“機器當人用”，透過智慧農業技術與設備的應用，提升農業生產效率。參照德國工業 4.0 的理念，智慧農業強調在生產過程中運用智能機械與數據分析，以實現更高效的生產模式。透過數位服務與智慧化生產，可實現精準農業管理，不僅提高資源使用效率，還能提升生產效能與產品質量，從而增強農產品在市場上的競爭力。

在農業防疫與病蟲害管理技術上，稻熱病與褐飛蝨是稻作產業最重要的病蟲害。稻熱病是全球最嚴重影響稻米生產的真菌性病害之一。葉稻熱病警示技術作為現代農業防疫的重要突破，為農民提供數位化數據支持，實現精準防治，不僅有效節省防治藥劑、提高防治效果，還能避免環境污染和農產品汙染，滿足消費者對農產品安全的需求。實證數據顯示，該技術準確率可達 82%，實施此技術的田區可顯著減少防治次數，並節省防治成本，每公頃可節省約 8,000 元。褐飛蝨是水稻的主要害蟲，會造成稻株枯萎與產量損失，並傳播病菌。褐飛蝨警示技術利用手機影像上傳至雲端識別系統，並通過人工智慧分析，及時提供防治建議。該技術能迅速評估病害情況，提高病蟲害防治效率，減少農藥使用，降低生產成本，並有助於降低農產品汙染風險。

在營養管理與灌溉技術上，營養管理技術能夠為農民提供合理化施肥的數位依據，提升肥料利用效率，減少資源與人力的浪費。此技術不僅能節省成本，還能確保作物獲得適宜的營養供應，減少過量肥料對環境的負面影響。智能灌溉水管理技術則通過實時監控土壤濕度及氣象數據，幫助農民制定科學合理的灌溉計畫，進而提高水資源的使用效率和作物的生長環境一致性。實驗結果顯示，該技術可節省 30%的灌溉水量，並提高稻米品質，對減少甲烷排放和達成淨零碳排目標具有積極作用。

在產量預測與收穫管理技術上，產量預測技術整合無人機、多光譜感測、植生指數分析及人工智慧演算法，可根據不同品種在各生育階段的光譜表現差異，建立高精度的產量預測模型。實際應用中，該技術的預測準確度可達 85-90%，有助於農民掌握稻穀的預期產量，提前進行烘乾設備排程及倉容調整。穀粒水分預測技術通過多光譜數據預測穀粒的水分含量，幫助農民確定最佳收穫時機，以保證稻米的品質與產量。農民可利用此系統快速評估水稻的最佳收穫時間，避免過早或過遲收穫影響稻米質量。

在智慧農業生態系建構上，促進智慧農業的發展，將稻作作為智慧農業示範場域，進行技術與設備的導入與推廣。透過建立智農服務生態系，結合農業生產、技術研發、資通訊服務及政府機構，形成協作共生的模式，實現智慧農業技術的深度應用與擴展。由政府與企業共同推動，新型態的農事服務公司“數農智匯”將於年底成立，進一步推動智慧農業進入新階段。本計畫的實施將有助於提升農業生產效能，改善農民的勞動條件，減少資源浪費，並確保農產品品質。通過智慧農業技術的應用，可望促使農業產業結構升級，實現農業的可持續發展。

四、結論

智慧農業作為現代化農業管理技術的綜合應用，不僅顯著提升了農業生產的效率與精準度，還有效減少了農民的生產成本。更為重要的是，這些技術的發展為應對氣候變遷帶來的挑戰提供了切實可行的解決方案，從而保障了農業生產的可持續發展。儘管智慧農業技術帶來了諸多優勢，實施過程中仍面臨一定挑戰。一方面，許多農民對新技術與設備缺乏了解，並且經驗傳承不足，這可能會影響技術的普及與應用。另一方面，智慧農業設備具有較高的維護與更新需求，加上外部環境變化可能對設備運行造成影響，這些因素都為技術的實施與普及增添了難度。此外，由於智慧農業設備的精密性要求定期維護與升級，因此資金投入的高需求仍然是實施過程中的一大障礙。

然而，隨著稻作智慧產銷管理生態系的發展，田間資訊將實現即時可得，這不僅將大幅提升栽種效率，減少資源浪費，還能有效確保食品安全。這一轉型將促進供應鏈機制的建設，提升農產品銷售效率，並增強消費者對產品質量的信任與信心。展望未來，智慧農業的發展將持續朝向更便捷、更透明、更整合的方向邁進。在生產端，將致力於擴大生產規模、提升作業效率及降低生產成本；在銷售端，則會進一步完善產地溯源機制，優化銷售通路，提升市場競爭力。這些努力將有助於推動農業產業的轉型升級，實現智慧化、數位化的現代農業產銷模式，並為台灣乃至全球農業帶來新的發展機會，使其在競爭日益激烈的全球市場中更加具備可持續性與競爭力。

參考文獻

1. 呂椿棠、卓瑋玄、呂秀英、魏夢麗、林汶鑫。2013。利用累積溫度與資通訊技術提升稻作田間管理效率。良質米產業發展研討會專刊 1-7。
2. 楊明德、蔡慧萍、許鈺群、曾信鴻 (2018),“人工智慧模型之建置與應用 ,”土木水利, 5 (5), 1-9.

3. 賴明信、李長沛、卓緯玄、顏信沐、吳東鴻、呂椿棠、張素貞。2013。良質水稻的健康管理。良質米產業發展研討會專刊 1-13。
4. Cen, H., Wan, L., Zhu, J., Li, Y., Li, X., Zhu, Y., ... & He, Y. (2019). Dynamic monitoring of biomass of rice under different nitrogen treatments using a lightweight UAV with dual image-frame snapshot cameras. Plant Methods, 15(1), 1-16.
5. Feng, J., & Wang, Z. (2021). Pedestrian Detection Algorithm in SSD Infrared Image Based on Transfer Learning. In Computer Supported Cooperative Work and Social Computing: 15th CCF Conference, ChineseCSCW 2020, Shenzhen, China, November 7–9, 2020, Revised Selected Papers 15 (pp. 697-704). Springer Singapore.
6. Guan, S., Fukami, K., Matsunaka, H., Okami, M., Tanaka, R.,Nakano,H., ... & Takahashi, K. (2019). Assessing correlation of high resolution NDVI with fertilizer application level and yield of rice and wheat crops using small UAVs. Remote Sensing, 11(2), 112.
7. Gyamfi, N. K., Goranin, N., Čeponis, D., & Čenys, A. (2022). Malware detection using convolutional neural network, a deep learning framework: comparative analysis. Journal of internet services and information security., 12(4), 102-115.
8. Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, and C.L. Walthall. (2008). Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agron. J. 100:117-131.
9. Lin, W. R., Lee, K. T., Wang, S. J., Lai, M. H., & Chen, P. H. (2019). A Monitoring and Forewarning System for Rice Planthoppers. Journal of Advanced Agricultural Technologies Vol, 6(3).
10. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C. Y., & Berg, A. C. (2016). Ssd: Single shot multibox detector. In Computer Vision–ECCV 2016: 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016, Proceedings, Part I 14 (pp. 21-37). Springer International Publishing.
11. Mahajan, U. 2016. Drones for normalized difference vegetation index (NDVI), to estimate crop health for precision agriculture: A cheaper alternative for spatial satellite sensor. International conference on innovative research in agriculture, food science, forestry, horticulture, aquaculture, animal science, biodiversity, ecological sciences and climate change (AFHABEC-2016). New Delhi.
12. Moore, D., G.D. Robson, and A.P.J. Trinci. Second edition. 2021. 21st century guidebook to fungi. p. 374-376. 14.9 plant disease basics: the disease triangle. United Kingdom. University of Cambridge.
13. Prasad, A.K., Chai, L., Singh, R.P., Kafatos, M., (2006). Crop yield estimation model for Iowa using remote sensing and surface parameters. Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinformat. 8 (1), 26–33
14. Yang, Q., Shi, L., Han, J., Zha, Y., & Zhu, P. (2019). Deep convolutional neural networks for rice grain yield estimation at the ripening stage using UAV-based remotely sensed images. Field Crops Research, 235, 142-153.
15. Zhang, N., Su, X., Zhang, X., Yao, X., Cheng, T., Zhu,Y.,... & Tian, Y. (2020). Monitoring daily variation of leaf layer photosynthesis in rice using UAV-based multi-spectral imagery and a light response curve model. Agricultural and Forest Meteorology, 291, 108098.

Development and Implementation of Smart Agricultural Technologies for Rice Cultivation: Building a Business Ecosystem

Ming-Hsin Lai[1], Dong-Hong Wu[1], Yi-Nian Chen[2], Shou-Horng Huang[3]

[1] Crop Science Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture.
[2] Plant Pathology Division, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture.
[3] Department of Plant Protection, Chiayi Agricultural Experiment Branch, Taiwan Agricultural Research Institute, Ministry of Agriculture.

ABSTRACT

The first phase of the Smart Agriculture Program for rice cultivation, initiated in 2017 (2017–2020), was designed to address the needs of industrial development by focusing on the research, development, and promotion of smart agricultural technologies. This phase successfully advanced industrial transformation and increased awareness of the concept of smart agriculture. With the launch of the second phase in 2023 (2023-2026), the program shifted its focus to enhancing efficiency, improving safety, and reducing risks. It emphasized the implementation and industrialization of technologies to ensure farmers reaped direct benefits from the advancements while creating new business opportunities. Successfully implemented technologies include warning technology for rice blast and brown planthoppers, nutrient and irrigation water management techniques, and yield and grain moisture prediction technologies. Through ecosystem development, the program established a commercial service model and facilitated the formation of new agricultural service companies, paving the way for the future development of smart agriculture by delivering measurable advantages and business opportunities for farmers.

Keywords: Rice, Smart agriculture, Business ecosystem, Multispectral image, Artificial intelligence